



同期発電機の高効率化に向けた無負荷損失の低減に関する研究

著者	中原 明仁
号	59
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5003号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62749

氏 名 なかはら あきひと 中 原 明 仁
授 与 学 位 博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日 平成26年9月24日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気エネルギーシステム専攻
学 位 論 文 題 目 同期発電機の高効率化に向けた無負荷損失の低減に関する研究
指 導 教 員 東北大学教授 一ノ倉 理
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 斎藤 浩海
東北大学教授 津田 理

論文内容要旨

全世界の発電電力の96%は、火力発電、原子力発電、水力発電によって担われており、これらの発電所の大部分が同期発電機を使用している。したがって、同期発電機には常に高効率化が要求される。大容量の同期発電機では、通常の鉄損、銅損、機械損に加えて、漏れ磁束によって発電機各部に生じるうず電流損が無視できない。また、並列結線された電機子コイルにおいて、各回路の電機子巻線に鎖交する磁束の差に起因した損失増加も指摘されている。同期発電機的设计では、これらの付加的損失を定量的に解析する必要がある。しかしながら、従来の損失計算では、経験的な補正係数を使用することが多く、設計における損失計算の誤差が大きいという問題があった。本論文は、同期発電機の高効率化には、鉄損や付加的損失などの無負荷損失の低減が重要であることに着目し、これらの無負荷損失を三次元磁界解析に基づいて詳細に分析し、損失の発生個所と発生要因を明らかにするとともに、その低減策を提案したもので、全5章からなる。

第1章は緒言であり、本論文の背景と目的を述べている。

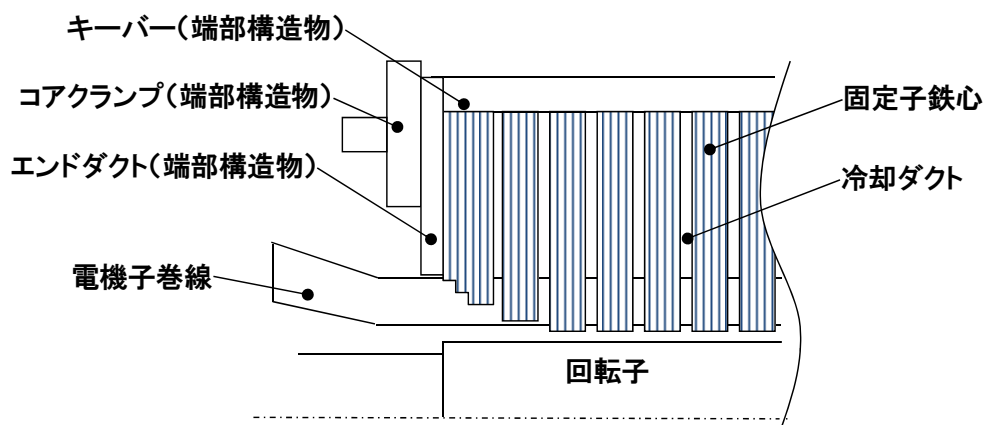
第2章では、同期発電機の損失のうち無負荷鉄損は比較的大きな比率を占め、高効率化を図る上で無負荷損失の低減が重要であることを示している。次いで、同期発電機の構造について詳述し、無負荷時においても漏れ磁束によって鉄心端部や巻線、および支持構造体に生じるうず電流損が無視できないことを説明している。これらの付加的損失は従来の設計における損失計算では測定値に基づく補正係数で考慮されており、必ずしも高精度に損失を予測できない点を課題として指摘している。さらに、漏れ磁束によってコイルの鎖交磁束が不均一になった場合や、発電機の極数と並列回路数の比が非整数の場合に、並列結線された電機子巻線間で循環電流が流れ、損失が増加することを述べている。

第3章では、タービン発電機の鉄損ならびに付加的損失について述べている。まず、鉄心における高調波磁束や回転磁束に対する鉄損も精度よく計算できるよう、鉄心における損失の計算式を整理している。鉄心材料の損失特性において磁束密度と周波数に対する依存性を再現するため、損失係数をテーブル化して計算する手法を導入している。また、電磁鋼板の圧延方向による損失特性の差異を固定子鉄心の周方向と径方向に近似する方法で

考慮している。

次に、付加的損失の発生箇所として、図1に示す各部位をモデル化し、磁界解析を用いて損失を算出している。

以上に基づいて 220 MVA および 170 MVA の同期発電機の無負荷損失を計算し、それぞれ 7 % および 4 % の誤差で算定可能であることを明らかにしている。また、付加的損失のうち、固定子鉄心端部とダクトに生じるうず電流損が比較的大きいこと、固定子鉄心に方向性電磁鋼板を採用することにより、通常は無方向性電磁鋼板に比べて鉄損が約 40 % 低減されることを明らかにしている。



損失	発生要因	計算方法
(1) セグメントギャップ渦電流損	セグメントギャップ 磁束移行	部分モデルによる 三次元磁界解析
(2) 端部構造物渦電流損	漏れ磁束	三次元磁界解析
(3) 電機子巻線の渦電流損	漏れ磁束	三次元磁界解析+解析式
(4) 固定子鉄心ダクトおよび端部渦電流損	ダクトおよび鉄心 端部の軸方向磁束	三次元磁界解析
(5) 冷却ダクト間隔片の損失	ダクト部磁束移行	三次元磁界解析
(6) 回転子表面損	高調波磁束	二次元磁界解析

図1 付加的鉄損発生部位のモデル化

第4章では、並列結線された電機子巻線に生じる循環電流損について述べている。並列回路を循環する電流は、各回路の電機子巻線に鎖交する磁束の差が原因となって生じる。そこで、まず、磁界解析を用いて循環電流による鎖交磁束を定量的に考察している。主磁束による磁気飽和の影響を考慮するため、磁界解析において主磁束を含んだ透磁率分布に対して回路ごとの循環電流を起磁力源として単独で通電する手法を適用し、各回路の循環電流が作る磁束を個別に分析している。分析の結果から、鉄心の磁気飽和が循環電流損増大の要因になることを指摘している。

次に、14極三相4並列回路を有する発電機を例として、極数と並列回路数の比が非整数の場合、並列回路間

の誘起電圧に位相差が生じ、これが循環電流の要因となることを指摘している。さらに、これらの電圧位相差を解消するため、図2に示すような電機子巻線結線法を提案している。磁界解析による計算結果から、提案した結線法によって無負荷損失の17 %に相当する循環電流損の低減が可能であることを確認している。

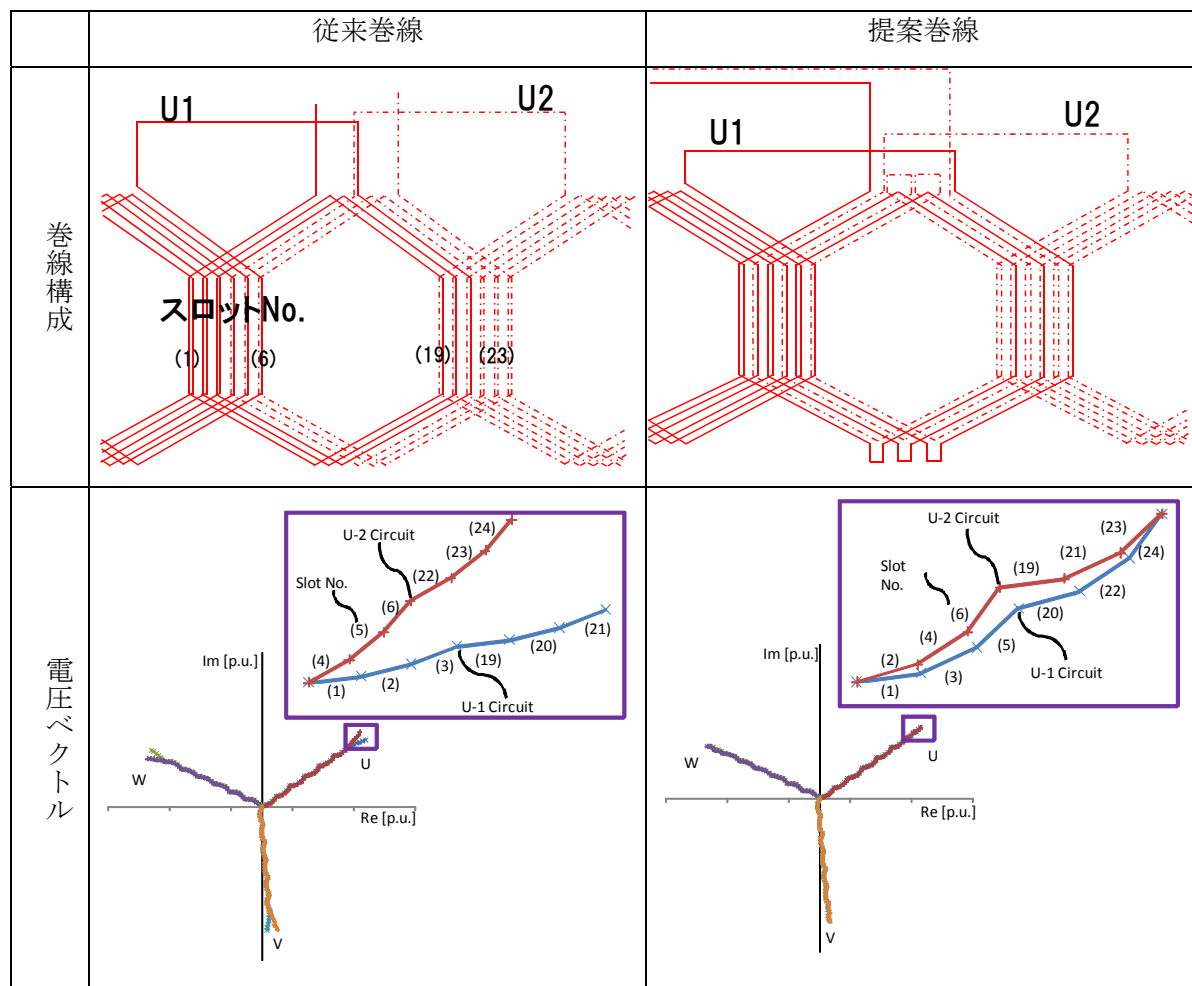


図2 従来および提案巻線の構成および電圧ベクトル

第5章は結言であり、本研究によって得られた成果をまとめている。

以上、本研究では、磁界解析を用いて無負荷損失の分析を行い、損失の発生箇所と要因を明らかにした。検討を通じて得られた知見を反映して損失低減を図ることで、同期発電機の更なる高効率化に貢献できることを示した。

論文審査結果の要旨

全世界の発電電力の 96 %は、火力発電、原子力発電、水力発電によって担われており、これらの発電所の大部分が同期発電機を使用している。したがって、同期発電機には常に高効率化が要求される。大容量の同期発電機では、通常の鉄損、銅損、機械損に加えて、漏れ磁束によって発電機各部に生じるうず電流損が無視できない。また、電機子コイルを並列結線することによって損失が増加することも指摘されている。同期発電機の設計には、これらの付加的損失を定量的に解析する必要がある。しかしながら、従来の損失計算では、経験的な補正係数を使用することが多く、設計誤差が大きいという問題があった。本論文は、同期発電機の高効率化には、鉄損や付加的損失などの無負荷損失の低減が重要であることに着目し、これらの無負荷損失を 3 次元磁界解析に基づいて詳細に分析し、損失の発生個所と発生要因を明らかにするとともに、その低減策を提案したもので、全編 5 章からなる。

第 1 章は緒言であり、本論文の背景と目的を述べている。

第 2 章では、同期発電機の構造について詳述し、漏れ磁束によって鉄心端部や巻線、および支持構造体に生じるうず電流損が無視できないことを指摘している。さらに、漏れ磁束によってコイルの鎖交磁束が不均一になった場合や、発電機の極数と並列回路数の比が非整数の場合に、並列結線された電機子巻線間で循環電流が流れ、損失が増加することを述べている。

第 3 章では、タービン発電機の鉄損ならびに付加的損失について述べている。発電機の磁束密度波形は各部によって異なるため、高調波磁束や回転磁束に対する鉄損も精度よく計算できるように、電磁鋼板における損失係数と周波数および磁束密度との関係式を整理している。さらに、固定子鉄心、電機子巻線、支持構造体、およびダクトに生じるうず電流損を算定するための 3 次元磁界解析モデルを構築している。以上に基づいて 220 MVA および 170 MVA の同期発電機の無負荷損失を計算し、それぞれ 7 % および 4 % の誤差で算定可能であることを明らかにしている。また、付加的損失のうち、固定子鉄心端部とダクトに生じるうず電流損が比較的大きいこと、固定子鉄心に方向性電磁鋼板を採用することにより、通常の無方向性電磁鋼板に比べて鉄損が約 40 % 低減されることを見出している。これは同期発電機の高効率化に有用な知見である。

第 4 章では、並列結線された電機子巻線に生じる循環電流損について述べている。まず、磁界解析を用いて循環電流による鎖交磁束を定量的に考察し、鉄心の磁気飽和が循環電流損の増大の要因になることを指摘している。ついで、極数と並列回路数の比が非整数の場合に、並列回路間の誘起電圧に位相差が生じ、これが循環電流の要因になることを明らかにしている。さらに、これらの電圧位相差を解消するための電機子巻線結線法を提案し、無負荷損失の 17 % に相当する循環電流損の低減が可能であることを確認している。これは、高効率同期発電機の設計指針となる有用な成果である。

第 5 章は結言であり、本研究によって得られた成果をまとめている。

以上要するに本論文は、磁界解析を用いて同期発電機の無負荷時の損失を詳細に分析し、その発生個所と発生要因を明らかにするとともに、これらの損失の低減策を提案したもので、電気機器工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。